

零散工业废水处理技术研究及工程应用

陈梓晟

森海环保集团有限公司，广东 广州 510506

DOI:10.61369/EAE.2025060016

摘要：零散工业废水处理技术的研究与应用已取得显著进展。通过对混凝沉淀、生物厌氧、生物接触氧化、过滤、膜分离、膜生物反应器（MBR）、高级氧化等工艺的探讨，结合东莞市的工程案例和经济效益评估，展示了多种处理技术的有效性和经济性。这些研究为解决中小微企业废水处理难题提供了技术支持，促进了环境保护与经济发展的协调统一。

关键词：零散工业废水；处理技术；工程应用

Research and Engineering Application of the Treatment Technology of Scattered Industrial Wastewater

Chen Zisheng

ENVITEK GROUP LIMITED, Guangzhou, Guangdong 510506

Abstract : Significant progress has been made in the research and application of scattered industrial wastewater treatment technologies. Through the exploration of processes such as coagulation sedimentation, anaerobic treatment, biological contact oxidation, sedimentation filtration, membrane separation, MBR membrane bioreactors, and advanced oxidation, combined with engineering case studies and economic benefit evaluations in Dongguan, the effectiveness and cost-efficiency of various treatment technologies are demonstrated. These studies provide technical support for addressing wastewater treatment challenges faced by small and medium-sized enterprises, promoting the coordination of environmental protection and economic development.

Keywords : scattered industrial wastewater; treatment technology; engineering application

引言

随着工业的快速发展，零散工业废水的处理成为亟待解决的环境问题。零散工业废水来源广泛，水质复杂，处理难度大^[1]。传统的处理方法难以满足日益严格的环保要求。因此，研究和应用先进的零散工业废水处理技术，不仅有助于保护生态环境，还能促进企业的可持续发展。本文将探讨零散工业废水的处理工艺、工程实例以及相关技术研究，为该领域的实践提供参考和指导。

一、零散工业废水处理工艺

（一）混凝沉淀

在零散工业废水处理中，混凝沉淀作为预处理技术被广泛采用。该方法通过向废水中投加铝盐或铁盐等混凝剂，促使悬浮颗粒及胶体物质聚集形成较大絮凝体，从而加速沉降。混凝反应分为快速混合与慢速絮凝两个阶段。前者确保混凝剂均匀分散并与污染物接触，后者使微小颗粒成长为大絮团。为提高效率，斜管/斜板沉淀池、高效沉淀池等新型设计应运而生。通过安装的小口径协管/斜板缩短了水流路径，降低水流扰动，提高了固液分离效率。磁混凝技术作为一种提高混凝沉淀效果的技术，结合传统混凝与磁粉使用。研究表明，磁粉能与污染物紧密结合，并借助磁场实现快速分离。合理的加药顺序（先磁粉和PAC，最后PAM）

有助于优化整个反应体系，提升水质透明度^[2]。

（二）生物厌氧

生物厌氧处理技术利用微生物在无氧条件下高效降解高浓度难降解有机废水，将其转化为甲烷和二氧化碳。该过程包含四个连续阶段：水解（大分子→小分子）、酸化（小分子→挥发性脂肪酸）、产乙酸（脂肪酸→乙酸/氢气/CO₂）和产甲烷（乙酸/氢气→甲烷/CO₂）^[3]。其核心优势在于利用颗粒污泥（沉降性好、活性高）维持高生物量及反应器稳定性，无需填料。UASB、EGSB和IC为现主流反应器，通过废水自下而上流动的生流式设计，扰动由微生物形成的污泥床，使废水中有机物与微生物充分接触，从而实现降解有机物并产生沼气。该类型生物厌氧反应器再通过顶部三相分离器实现气液固高效分离。此类反应器具有处理负荷高、去除率高、能耗低的显著优点。然而，该技术对温

作者简介：陈梓晟（1991-），男，工程师。

度、pH等运行参数敏感，需精确控制以保障微生物活性与处理效能。在零散工业废水处理中，需根据收治废水水质水量合理配水以保证生物厌氧工艺及后续处理工艺高效稳定运行。

(三) 生物接触氧化

生物接触氧化法是一种结合活性污泥法与生物膜法特点的生物处理工艺。其核心是在反应池内设置高比表面积填料，微生物附着在填料上形成生物膜，通过池底曝气维持废水扰动状态并充分充氧。废水中有机污染物的去除主要依赖生物膜内微生物的氧化分解作用。该工艺优势显著：高比表面积填料与良好充氧条件保障了高生物固体浓度与容积负荷；大量生物膜及水流完全混合使其具备优异的抗冲击能力；同时具有剩余污泥产量少、无污泥膨胀风险、运行管理简便的特点。工程实践中，该技术广泛应用于生活污水及工业废水（如印染废水）处理，通过优化填料选型与运行参数，可有效降解有机物，以实现达标排放。综上，生物接触氧化工艺在零散工业废水处理领域具有重要应用价值。

(四) 过滤技术

过滤技术在废水处理中扮演着关键角色，主要用于去除水中的细小悬浮物和胶体颗粒，实现深度固液分离。该技术通过滤料（如砂、活性炭等）的截留作用去除杂质，常用的过滤设备包括砂

滤池和活性炭滤池等。近年来，新型过滤技术如活性砂过滤、动态膜、滤布滤池等，凭借其高效、低耗的特点，在废水处理领域得到日益广泛的应用。随着环保要求的不断提高，过滤技术正朝着高效、低能耗、自动化的方向持续发展。通过研发新型滤料和优化工艺流程，可以进一步提升过滤效率，降低运行成本，以满足日益严格的水质排放标准。在零散工业废水处理中，过滤技术作为深度处理的重要环节，能够有效去除残留的悬浮物和胶体颗粒，确保出水水质达标，是实现零散工业废水高效处理的关键技术之一。

二、零散工业废水处理技术研究

(一) 膜分离技术

膜分离技术是一种利用半透膜的选择性透过特性，实现混合物中不同组分分离的过程^[4]。这种技术无需化学反应，仅通过物理方式将物质分离，因此具有能耗低、操作简便、无二次污染等优点，特别适用于废水处理领域。根据膜孔径的大小，膜分离技术可以大致划分为微滤（MF）、超滤（UF）、纳滤（NF）和反渗透（RO）四种类型。

表1 膜分离技术的类型

膜类型	孔径范围	主要用途	备注
微滤（MF）	0.1–10微米	去除悬浮固体、大颗粒物质和部分微生物	适用于初步过滤
超滤（UF）	0.01–0.1微米	分离病毒、细菌、蛋白质和部分高分子有机物	适用于去除较小的颗粒和微生物
纳滤（NF）	约1纳米	选择性去除二价离子和部分单价离子，如钙、镁和硫酸根等	介于超滤和反渗透之间，适用于部分脱盐
反渗透（RO）	小于1纳米	去除全部的溶解性离子和大部分有机物	广泛应用于海水淡化和工业废水脱盐

膜分离技术不仅提高了废水处理效率，还实现了资源的回收再利用。例如，在染料废水处理中，纳滤和反渗透技术可以高效去除废水中的有机溶剂和残留的活性药物成分，达到严格的排放标准^[5]。较之于传统的过滤技术而言，膜分离技术可在分子范围内分离，这是一种物理过程，无需发生相的变化或者添加助剂。膜分离技术虽然具有高效、节能等优势，但其劣势在于膜材料成本较高，运行过程中容易发生污染和堵塞，需定期清洗和更换，增加了维护成本。

(二) 膜生物反应器（MBR）

膜生物反应器（MBR）是一种将膜分离技术与生物技术有机结合的新型废水处理技术。它通过膜分离设备截留生化反应池中的活性污泥和大分子有机物，无需设置二沉池^[6]。MBR技术利用膜分离技术显著增强了生物反应器的处理效率和稳定性，使活性污泥浓度得到显著提升，其水力停留时间（HRT）和污泥停留时间（SRT）可以分别进行精准控制^[7]。

MBR技术的主要优点包括：(1)高效的固液分离，出水水质良好、稳定，可以直接回用。(2)剩余污泥产量少，降低了污泥处理费用。(3)占地面积小，模块化设计，便于扩建。(4)操作管理方便，易于实现自动化控制。

MBR技术在城市污水和工业废水处理与回用等方面已得到了广泛应用。例如，在制药废水处理中，MBR技术能够有效去除废水中的抗生素和有机物，出水水质达到回用标准。在电子工业废水处理中，MBR技术能够去除废水中的重金属和有机物，保护环境和水资源^[8]。

尽管MBR技术具有许多优点，但其高昂的建设和运行成本

仍然是推广应用的主要障碍。因此，研究者们正在努力开发更经济、更高效的MBR工艺，如通过优化膜材料和膜清洗技术来降低膜污染和能耗，通过改进生物反应器的设计来提高处理效率和降低运行成本^[9]。

(三) 膜化学反应器（MCR）

膜化学反应器（MCR）是一种将膜分离技术和化学反应相结合的新型水处理技术。它利用反应器内高化学浓度特性，强化胶体、悬浮物、溶解性盐类物质等架桥及其反应，并利用膜分离实现超细悬浮物、总金属离子等高效去除，从而实现水质净化，无需设置沉淀池。MCR技术可替代传统的混凝沉淀和超滤组合工艺，节省占地，实现系统提标改造，与膜分离、蒸发结晶等技术配合可实现浓盐水减量和零排放^[10]。

MCR技术的主要优点包括：(1)产水水质好，浊度低，甚至可达到零排放预处理；(2)系统能耗低，无需大流量回流和反冲洗；(3)系统集成度高，可替传统的混凝沉淀和超滤组合工艺，简化废水处理流程；(4)操作维护便利，集成自控系统，控制曝气和冲洗周期。

MCR技术在城市污水和工业废水处理与回用均得到广泛的应用。例如，在电子制造业（线路板酸洗废水处理），通过MCR膜工艺可高效分离并回收金属，提高资源利用率，同时降低废水排放成本。在化工及制药行业，MCR技术可用于化工废水的预处理或深度处理，特别是含有高COD、有机污染物的废水处理，结合生化工艺可达到更高的去除率。

尽管MCR技术具有许多优点，但是其膜污染问题、投资成本高、膜寿命有限等因素是其推广应用的主要障碍。因此，未来需

要进一步优化膜材料和工艺设计，降低投资和运行成本，同时加强膜的清洗和维护技术，延长膜的使用寿命。

(四) 高级氧化技术

高级氧化技术是一种利用强氧化剂或光、电、声等能量激活的氧化剂产生羟基自由基（·OH）等具有强氧化能力的自由基，从而实现高效分解废水中有机污染物的技术。这种技术适用于多种有机物的处理，包括生物可降解物和生物难降解的有机物。高级氧化技术具有处理范围广、高效性的优点，能够快速分解废水中的有害物质，从而在短时间内达到处理废水的效果。

表2 高级氧化技术的主要类型

类型	作用
化学氧化	利用高活性化合物产生具有强氧化能力的自由基，分解有机物。
光催化氧化	利用光催化剂（如TiO ₂ ）在紫外光照射下产生具有强氧化能力的自由基，分解有机物。
电化学氧化	通过电解产生具有强氧化能力的自由基，分解有机物。
声化学氧化	利用超声波产生空化效应，产生具有强氧化能力的自由基，分解有机物。
组合氧化	利用光催化氧化、电化学氧化、声化学氧化、化学氧化等高级氧化技术相互组合，产生具有强氧化能力的自由基，分解有机物。

高级氧化技术在处理高浓度难降解有机物，提高废水可生化性，废水深度处理等方面具有显著优势。例如，在染料废水处理中，高级氧化技术能够有效分解难生物降解的染料分子，去除色度和毒性。在农药废水处理中，高级氧化技术能够分解农药分子，降低其生物毒性。

尽管高级氧化技术具有高效性，但其运行成本较高，且对废水的预处理要求较高。因此，研究者们正在探索更经济、更实用的高级氧化工艺，如通过优化反应条件和催化剂来降低能耗和运行成本，通过与其他处理技术（如生物处理）的组合来提高处理效率和降低成本。

三、零散工业废水处理技术的应用

(一) 工程案例分析

在广东零散工业废水处理中，多地先进工艺成效显著。东莞

中溥环保科技有限公司采用预处理、一级高级氧化、混凝沉淀、厌氧-缺氧-好氧、MBR、二级高级氧化及生物滤池等工序，处理能力800m³/d，出水稳定达DB44/26第二时段三级标准，运行两年抗冲击负荷强（COD<30mg/L，镍<0.1mg/L），年节水超10万吨^[11]。另外，广州市首家第三方服务企业元泰环境科技的处置中心，以气浮/铁碳微电解预处理结合混凝沉淀、UASB、二级AO及除磷沉淀工艺，处理能力1000m³/d，出水TN稳定达GB/T31962-2015B级标准，其余指标均符DB44/26第二时段三级标准^[11]。

(二) 经济效益评估（以东莞市为例）

东莞市首创“零散工业废水”集中处理模式，针对性解决中小微企业日均排放量不足3吨非危险废水的处理难题，成效显著。截至2022年，全市累计转运处理废水约33.36万吨，日均处理914吨；通过社会投资建成5家处理单位，总处理能力达2550吨/日，全面满足集中处理需求。相较于企业分散处置的高成本与低效问题，集中模式大幅降低企业经营成本——按单厂20万元治污设施建设费估算，全市1.2万余家涉废企业共节省建设成本24亿元^[12]。

该模式兼具多重效益：集中处理简化管理操作，杜绝超标排放，减轻水环境压力；项目建设运营创造就业岗位，助力地方经济发展；运营中严格落实环保政策，有效削减污染物排放。同时，通过废水回用提升资源效率，进一步降低企业用水成本，实现了“企业降本、环保达标、社会增效”的共赢。其在经济效益、环境效益与社会效益上的突出表现，为全国同类地区提供了可复制的实践经验。

四、结束语

零散工业废水处理技术的研究与应用对环境保护和社会经济发展具有重要意义。通过多种先进工艺的有机结合，不仅提升了废水处理效率，还可实现了资源回收和循环利用。在实际应用中，科学的工程设计和高效的管理模式进一步优化了技术效果，降低了运行成本。未来需持续推动技术创新与管理优化，为实现可持续发展目标提供技术支撑和实践经验。

参考文献

- [1] 倪凌峰, 王沛芳, 王亚宜. 电化学氧化技术在MBR中的膜污染控制研究与应用进展 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(10): 127-135.
- [2] 杜子谦. 一种零散工业废水处理工艺 [J]. 广州化工, 2020, 48(2): 3.
- [3] 吴琼, 王雄, 李国洪, 等. 大冶市城西北工业废水处理厂工程设计实践 [J]. 给水排水, 2020, 46(2): 63-67, 73.
- [4] 高云霄. 膜处理工艺在高盐工业废水零排放中的应用 [J]. 区域治理, 2019(44): 4.
- [5] 王梦莹, 焦忠红, 段维超, 等. 膜分离技术在工业废水零排放工艺中的应用研究 [J]. 山东化工, 2024, 53(4): 261-264.
- [6] 张健. MBR膜技术用于污水处理的研究分析 [J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(11): 16-18.
- [7] 李淑辉. MBR膜生物反应器在污水处理中的发展及应用 [J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术: 00184-00184.
- [8] 王殿帆. 探析MBR技术在工业污水处理中的应用 [J]. 区域治理, 2020, 4(3): 0161-0161.
- [9] 崔尚发. MBR技术在工业废水处理应用中的研究进展 [J]. 探索科学, 2019, (11): 219.
- [10] 李文刚, 孙耀胜, 么强, 等. 新型有机污染物污染现状及其深度处理工艺研究进展 [J]. 环境工程, 2021, 39(8): 77-87.
- [11] 杨洋. 零散工业废水处理模式的改进研究 [J]. 广东化工, 2023, 50(21): 126-127.
- [12] 徐志清, 赵焰, 陆梦楠, 等. 基于膜法的火电厂废水零排放技术研究及应用 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(S1): 148-154.